

常時微動と地震応答解析による埋立地盤の振動挙動と地震被害との関係

早川清¹・松井保²・江川典聰³・尾儀一郎⁴

¹正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科

²正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

³正会員 工修 阪神高速道路公団 神戸第二建設部

⁴正会員 日本技術開発株式会社 大阪支社

兵庫県南部地震では、湾岸部の広い範囲で液状化や側方流動などによって多大な被害が発生した。本報告では、これらの埋立地盤の動的特性を、常時微動の測定結果および1次元地震応答解析から判定し、液状化発生の有無との関連性について考察した。その結果、各埋立地盤の卓越周期は類似の傾向を示し、応答解析結果と常時微動測定値が良い対応を示した。また、常時微動のH/Vスペクトル比が0.5~1.6付近にかけて顕著な卓越周期が存在し、そのスペクトル比が2以上になるものが液状化発生地点によく対応している。これとは逆に、0.5以下の短周期側にピークが生じているものが非液状化地点と対応していることが分かった。

Key Words: microtremor, liquefaction, earthquake damage, site investigation

1. はじめに

兵庫県南部地震では、沿岸埋立地および沖合人工島であるポートアイランドと六甲アイランドに地盤の液状化や側方流動などによって多大の被害が生じた。本報告では、これらの埋立地盤の動的特性を常時微動の測定結果を用いて検討する。すなわち、常時微動のパワースペクトルおよびH/Vスペクトル比を求めて埋立地の卓越周期を算定するとともに、ポートアイランドを対象地として地震前後の常時微動特性について検討する。さらに、沿岸部の埋立地に関してボーリング柱状図を参考にして解析基盤を想定し、ポートアイランドで観測された地震波形を入力して地震応答解析を行う。これらを総合して、液状化災害の発生の有無との関連性についても考察する。

2. 調査地域

常時微動の測定は、ポートアイランドで8ヶ所、

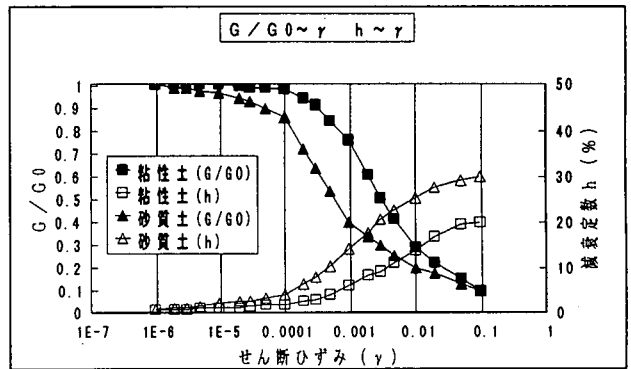


図-1 剛性および減衰定数のひずみ依存曲線

六甲アイランドで6ヶ所行った。また、沿岸部埋立地の対象地点は、鳴尾浜、甲子園浜、深江浜、魚崎浜、六甲アイランド、西宮浜の6ヶ所である。

測定地域の地質概要、常時微動の測定ならびに解析方法については既報を参照されたい^{1), 2), 3)}。

3. 地震応答解析手法

常時微動測定地点について一次元動的応答解析を

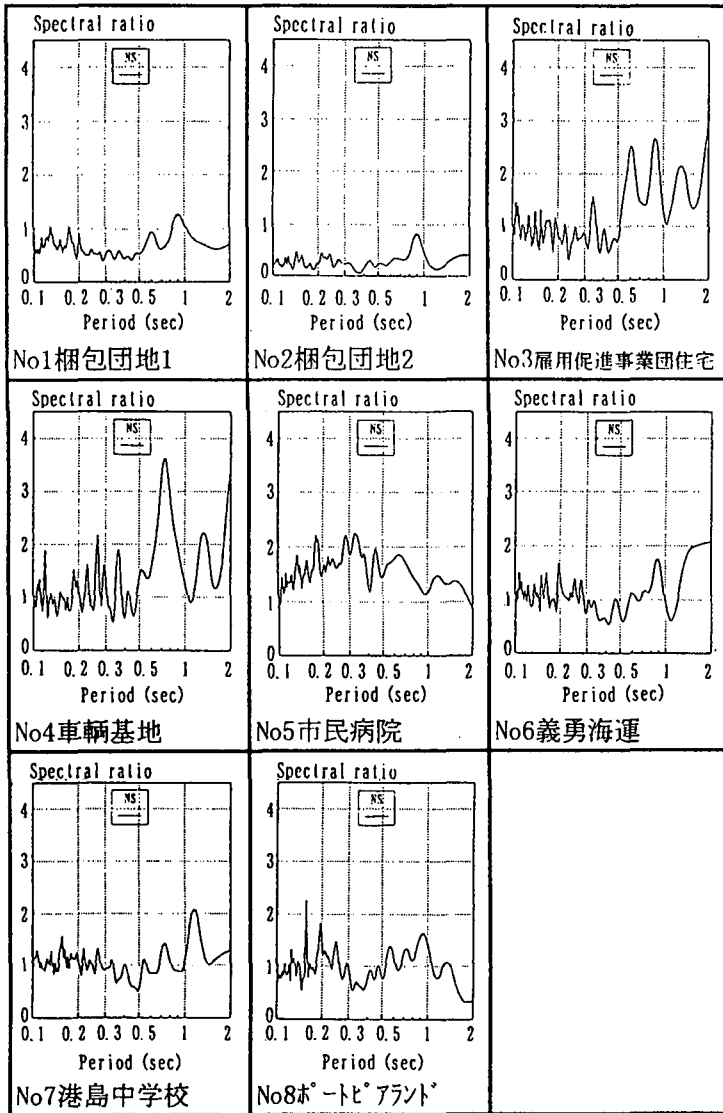


図-2 ポートアイランドのH/Vスペクトル比

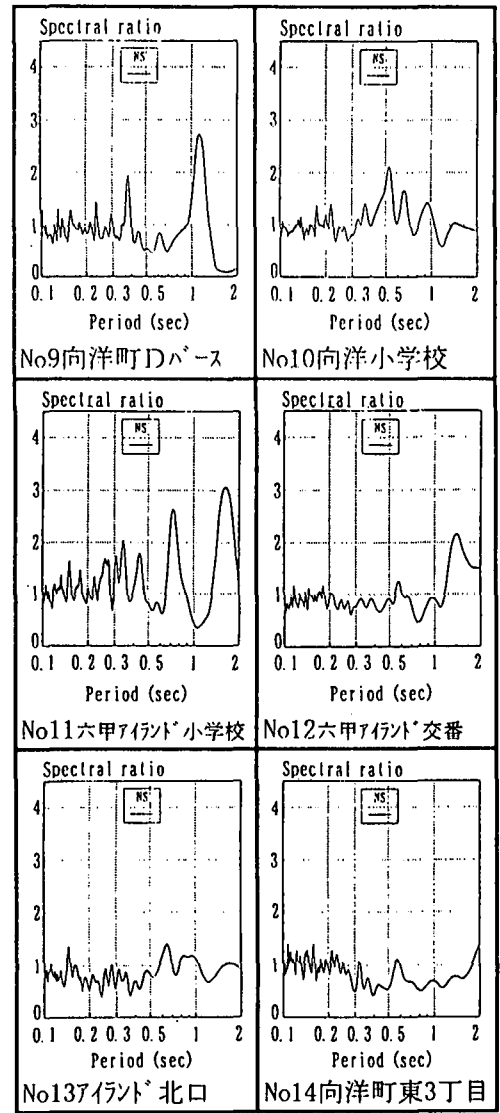


図-3 六甲アイランドのH/Vスペクトル比

実施した。解析条件は以下の方法による。

- ・入力地震波形：ポートアイランド GL-83mNS観測波形、最大加速度；679gal、時間刻み；0.01秒
- ・地盤のひずみ特性：図-1のG～γ、h～γ曲線、収束判定基準；5%、有効ひずみ係数0.65
- ・地震入力基盤面：N>50の洪積砂礫層

4. 解析結果および考察

(1) 常時微動のH/Vスペクトル比による卓越周期
常時微動による地盤の卓越周期をより良く表示する手法として、上下成分と水平成分とのスペクトル比が多用されるようになってきている。各測定地点におけるH/Vスペクトル比を表示したものが図-2（ポートアイランド）、図-3（六甲アイランド）である。これらの図より判定される卓越周期は、0.2～0.4"の短周期成分、0.6～0.9"の中間周期

表1 固有周期の計算値

深さ(m)	土層区分	固有周期(秒)
0～-15	埋立土層	0.36
-15～-25	沖積粘性土 (Ma13)	0.88
-25～-33	洪積粘性土と砂質土の互層	0.78
-33～-56	第1洪積砂礫層	1.01
-56～-78	洪積粘性土層 (Ma12)	1.22

成分および1.1～1.6"の長周期成分に区分される。

(2) 2層地盤モデル法による固有周期

ポートアイランドの測定地点No1は、地震動のアレ観測地点に相当している。この地点では、地震後にも詳細な地盤調査⁴⁾が実施されている。そこで、この結果を利用して2層地盤モデルによる逐次計算法により固有周期を土層区分ごとに求めたものが表-1である。常時微動の測定結果における0.2～0.4"の短周期成分は深さ-15mまでの埋立土層の固有周

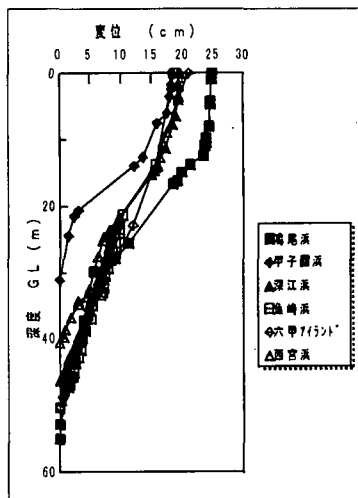


図-4 地盤の最大応答変位分布

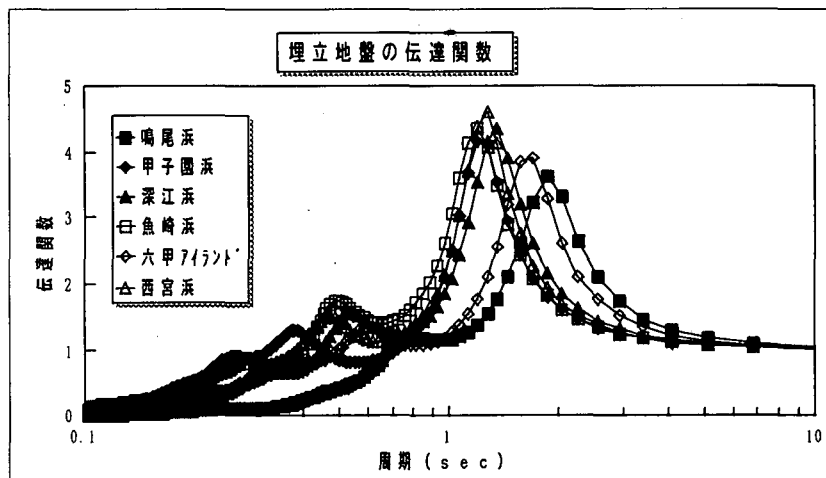


図-5 地表面の伝達関数

表-2 地震前後の常時微動の卓越周期(sec)

	No1梱包団地	No4車両基地	No5市民病院
地震前		地盤改良前 ⁵⁾ 0.83~1.25	地盤改良前 ⁶⁾ 0.35
		地盤改良後 0.10~0.13	地盤改良後 0.33
		地盤改良後(盛土) 0.1, 0.18, 0.27	(GL-8mでの測定値)
地震後	0.18, 0.6, 0.9 0.3, 0.4~0.5 ⁴⁾ 0.9~1.5	0.25, 0.7 1.3	0.18 0.29~0.32 0.45, 0.6

期に相当している。また、0.6~0.9" の中間周期成分は、深さ-15m~-25mの沖積粘性土 (Ma13) または、深さ-25m~-33mの洪積の粘性土層と砂質土層の互層までを考慮したものに一致する。さらに1.0" 以上の長周期成分は、深さ-33m~-56mにある第1洪積砂礫層および深さ-56m~-78mにある洪積粘土層 (Ma12) までを考慮すると、計算値が実測値を説明できるようである。

(3) 地震前後の常時微動特性の比較

地震前後の常時微動の卓越周期を比較したものが表-2である。No1地点では0.2"、0.6" および0.9" 付近に、No4地点では0.3"、0.7" および1.3" 付近に、また、No5地点では0.2" ~0.3"、0.5~0.6" 付近に卓越周期のあることが分かる。

No5地点では、0.3" 程度の卓越周期成分は地震前後で生じているが、0.6" の中間周期成分は地震後のみに見られる。一方、No4地点では0.3" 付近の短周期成分、0.7" 付近の中間周期成分および1.3" 付近の長周期成分は地震前後に共通して見られる。

(4) 常時微動と地震応答解析による地盤の振動特性の比較

図-4に沿岸埋立地の地盤の最大応答変位分布を示し、図-5に各地点の地表面の伝達関数を示す。

また、沿岸埋立地における常時微動の卓越周期と地震応答解析による地表面の最大応答加速度、伝達関数から求めた卓越周期、さらに前述の2層地盤モデル法により求めた固有周期を表-3に示した。これらより、常時微動による短周期の卓越周期成分0.3" と0.5~0.6" および長周期の卓越成分1.0~1.6" が、伝達関数より求めた卓越周期と一致することが理解される。また、2層地盤モデル法で求めた固有周期が0.5~0.8" であることから、上述したように常時微動がかなり地盤の深部の地盤振動特性をも含んでいることが示唆される。

(5) 常時微動の液状化評価への適用性

既往の調査報告書⁴⁾ から、ポートアイランド、六甲アイランドにおける地盤の液状化発生の有無を図-2、図-3の各点に対し推定すると、液状化発生地点は、測定地点No1、No3、No4、No5、No7、No9およびNo13である。一方、非液状化地点に相当するものはNo2、No6、No8、No10、No11、No12およびNo14と考えられる。このことと常時微動のH/Vスペクトル比の形状を対応させて検討してみると、0.5" 付近~1.6" 付近にかけて顕著な卓越周期が存在し、そのスペクトル比が2以上になるものが液状化発生地点に相当するようである。すなわち、No1、No3、No4、No6、No7、No9、No11およびNo12がこの条件に適合している。この傾向とは逆に0.5" 以下の短周期側にH/Vスペクトル比のピークが生じている測定地点No5、No8、No10およびNo14が非液状化地点と

表-3 常時微動測定結果と地震応答解析結果の比較

測定地点	常時微動による卓越周期 (sec)	想定基盤面の深さ (m)	地表面の最大応答加速度 (gal)	伝達関数により求めた卓越周期 (sec)	2層地盤モデル法による理論値(sec)
鳴尾浜	0.2~0.3, 0.5, 0.7~0.8, 1.6	55.2	335.5	0.79, 1.85	0.67
甲子園浜	0.2~0.4, 0.5~0.6	31.3	580.6	0.48, 1.2	0.70
深江浜	0.2~0.3, 0.5~0.6, 1.0~1.2, 1.7	46.3	480.3	0.53, 1.3	0.57
魚崎浜	0.2~0.3, 0.7~0.9, 2.0	50.3	681.4	0.50, 1.2	0.62
六甲アイランド	0.2~0.3, 0.5~0.6, 1.3~1.4	50.5	407.1	0.60, 1.6	0.76
西宮浜	0.2~0.4, 1.4~1.6	40.5	560.8	0.36, 1.2	0.74

判断される。No2とNo13はこれら両者の中間領域にある。

なお、No1地点近傍のNo2地点では地盤改良が行われている。現状では地盤改良の有無によるものかどうか確定はできないが、両地点の常時微動に違いが見られることは興味深い。

5. まとめ

本報告では、兵庫県南部地震で地盤災害を生じた埋立地における地盤の振動特性を、常時微動の観測結果および1次元地震応答解析から判定し、液状化発生の有無との関連性について考察した。この結果、以下のような知見が得られた。

- ①常時微動の観測によると、埋立地の卓越周期は0.2~0.4"、0.5~0.9"、1.1~2.0"にある。
- ②0.2~0.4"の卓越周期は埋立土層の影響によるもの、0.6~0.9"のものは、沖積粘土層(Ma13)または洪積互層の影響によるもの、また、1.0"以上のものは第1洪積砂礫層および洪積粘土層(Ma12)までの影響によるものと認められる。
- ③ポートアイランド第1期埋立地盤での常時微動の周期特性は、震災前後でほぼ同様であった。
- ④地震応答解析から求めた地盤の卓越周期は、0.5

~0.6"、1.0~1.6"の領域で常時微動の結果と良く一致する。

- ⑤スペクトル比が0.5~1.6"付近で卓越周期を持ち、かつその比の値が2以上になるものが、液状化発生地点に良く対応している。

参考文献

- 1)早川清他：神戸地域の埋立地における常時微動特性，第31回地盤工学研究発表会論文集，pp. 1095~1096，1996年7月
- 2)早川清他：兵庫県南部地震による埋立地の地盤災害と常時微動特性との関係，土木学会第2回阪神・淡路大震災に関する学術論文集，pp. 15~16，1997年1月
- 3)早川清他：常時微動測定と地震応答解析による埋立地の地震災害について，第32回地盤工学研究発表会，1997年7月（発表予定）
- 4)神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査報告書（ポートアイランド、六甲アイランド），1995年
- 5)坪井英夫：地盤改良前後の土の動的特徴変化に関する研究，昭和52年度京都大学防災研究所委託研究報告，1977年、
- 6)堯夫義久他：神戸ポートアイランドにおける地盤改良工事に伴う振動試験報告，日本建築学会近畿支部研究報告集，1981年6月